

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-296677

(43)Date of publication of application : 21.10.2004

(51)Int.Cl.

H01L 39/22  
G01R 33/035  
H01L 39/24

(21)Application number : 2003-085719

(71)Applicant : NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS  
SCIENCE

(22)Date of filing : 26.03.2003

(72)Inventor : TAKANO YOSHIHIKO  
HATANO TAKESHI  
KAWAKAMI SHINICHI  
ISHII AKIRA  
ARISAWA SHUNICHI  
TACHIKI AKIRA  
YAMASHITA TSUTOMU

## (54) SQUID MAGNETIC SENSOR AND ITS MANUFACTURING METHOD

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a supersensitive SQUID magnetic sensor and a method for manufacturing the SQUID magnetic sensor.

SOLUTION: In the SQUID magnetic sensor, single high temperature superconductive Josephson tunnel junction (4) is used. The single high temperature superconductive Josephson tunnel junction (4) is formed by crossing a pair of single crystals (1), (2) of a high temperature superconductor on a substrate by heat treatment at a cross angle of  $0^\circ$  -  $90^\circ$  for joining. The high temperature superconductive Josephson tunnel junction is divided into two by forming a through hole (5) passing through the pair of signal crystals from the side of the high temperature superconductive Josephson tunnel junction while the joining interface of the single crystals is included. A loop-like joining structure is composed of the pair of single crystals.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

17.10.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application converted  
registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of  
rejection][Date of requesting appeal against examiner's decision of  
rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP1 are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1]

It is a SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is combined by crossing on the substrate in the crossover include-angle range of  $-90^\circ$  of  $0^\circ$  degree,

The SQUID magnetic sensor characterized by for an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction being divided into two by the through tube which made said single crystal of a pair penetrate including the joint interface, and joint loop-formation-like structure being constituted from a side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction with the single crystal of a pair.

[Claim 2]

The SQUID magnetic sensor according to claim 1 characterized by the single crystals of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced being any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker, and the single crystal processed thinly.

[Claim 3]

The SQUID magnetic sensor according to claim 1 or 2 characterized by for the single crystal of the high temperature superconductor of a pair being a bismuth system, and the superconduction phase being any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases, or two sorts or more of these phases of combination

[Claim 4]

It is the production approach of the SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair was made to cross on a substrate by heat treatment in the crossover include-angle range of  $-90^\circ$  of  $0^\circ$  degree, and was combined,

The production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by forming the through tube which penetrates the single crystal of a pair including the joint interface, dividing an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction into two, and constituting joint loop-formation-like structure from a side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction with the single crystal of a pair.

[Claim 5]

The production approach of the SQUID magnetic sensor according to claim 4 characterized by forming a through tube in an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction using convergence ion beam machining equipment.

[Claim 6]

The production approach of the SQUID magnetic sensor according to claim 4 or 5 characterized by forming a through tube in the part which put slitting into the side face of the single crystal of the high temperature superconductor of the united pair, narrowed width of face, and narrowed width of face after that from the side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction.

[Claim 7]

claim 4 characterized by the single crystals of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced being any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker, and the single crystal processed thinly, thru/or 6 — the production approach of a SQUID magnetic sensor given in either.

[Claim 8]

claim 4 characterized by for the single crystal of the high temperature superconductor of a pair being a bismuth system, and the superconduction phase being any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases, or two sorts or more of these phases of combination thru/or 7 — the production approach of a SQUID magnetic sensor given in either.

[Claim 9]

claim 4 characterized by controlling the property of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by changing the crossover include angle of the single crystal of the high temperature superconductor of a pair thru/or 8 — the production approach of a SQUID magnetic sensor given in either.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention]

Invention of this application relates to the production approach of a SQUID magnetic sensor and a SQUID magnetic sensor. Invention of this application relates to the production approach of the SQUID magnetic sensor which can produce the SQUID magnetic sensor which used the elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction and SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity easily and good in more detail.

[0002]

[Description of the Prior Art]

The Josephson tunnel junction component (SIS-JJ element) using a superconductor is a basic component of a superconducting element, and application has been advanced as a RF component, a SFQ component (SFQ:Single Flux Quantum (single fluxoid quantum)), a SQUID magnetic sensor component, etc.

[0003]

Although research of the former many had been made since improvement in the engine performance was further expected when the Josephson tunnel junction using a high temperature superconductor was produced, the Josephson tunnel junction by the high temperature superconductor with sufficient repeatability was not realized until now.

[0004]

In the above situations, it joined together by heat-treating in the condition of having made the elevated-temperature superconduction whisker crystal of a pair crossing on a substrate, and the artificer of this application etc. proposed producing the single Josephson tunnel junction to a part for the bond part of the elevated-temperature superconduction whisker crystal of that pair (the patent reference 1 and application for patent 2002-275873).

[0005]

However, the application at the present stage, as for the above Josephson tunnel junctions, the production approach and property were just found out, and using it was not made until now.

[0006]

[Patent reference 1]

JP,2002-141566,A

[0007]

Then, invention of this application is made in view of the situation as above, and makes it the technical problem to offer the production approach of the SQUID magnetic sensor which can produce the SQUID magnetic sensor using an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction and SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity easily and good.

[0008]

[Means for Solving the Problem]

First invention of this application as what solves the above-mentioned technical problem to the 1st It is a SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is combined by crossing on the substrate in the crossover include-angle range of -90 ° of 0 degree. An elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is divided into two by the through tube which made said single crystal of a pair penetrate including the joint interface from the side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction. The SQUID magnetic sensor characterized by joint loop-formation-like structure consisting of single crystals of a pair is offered.

[0009]

The 2nd is provided with the SQUID magnetic sensor characterized by the single crystals of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced being any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker, and the single crystal processed thinly, in the 1st invention.

[0010]

In invention of the 1st or 2, the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is a bismuth system, and the 3rd is provided with the SQUID magnetic sensor characterized by the superconduction phase being any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases, or two sorts or more of these phases of combination.

[0011]

It is the production approach of the SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair was made to cross in the 4th on a substrate by heat treatment in the crossover include-angle range of  $-90^\circ$  of  $0^\circ$ , and was combined with it. Form the through tube which penetrates the single crystal of a pair including the joint interface, and an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is separated into two from the side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction. The production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by constituting joint loop-formation-like structure from a single crystal of a pair is offered.

[0012]

The 5th is provided with the production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by forming a through tube in an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction using convergence ion beam machining equipment in the 4th invention.

[0013]

The 6th is provided with the production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by forming a through tube in the part which put slitting into the side face of the single crystal of the high temperature superconductor of the united pair, narrowed width of face, and narrowed width of face after that from the side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction in invention of the 4th or 5.

[0014]

the 7th — the 4th thru/or 6 — in one of invention, the production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by the single crystals of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced being any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker and the single crystal processed thinly, is offered.

[0015]

the 8th — the 4th thru/or 7 — in one of invention, the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is a bismuth system, and the production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by the superconduction phase being any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases or two sorts or more of these phases of combination is offered.

[0016]

the 9th — the 4th thru/or 8 — in one of invention, the production approach of the SQUID magnetic sensor characterized by controlling the property of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by changing the crossover include angle of the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is offered.

[0017]

[Embodiment of the Invention]

Although invention of this application has the description as above-mentioned, it explains the gestalt of that operation below.

[0018]

The SQUID magnetic sensor of invention of this application It is a SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair is combined by crossing on the substrate in the crossover include-angle range of  $-90^\circ$  of  $0^\circ$ . It is characterized [ big ] by for an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction being divided into two by the through tube which made said single crystal of a pair penetrate including the joint interface, and joint loop-formation-like structure being constituted from a side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction with the single crystal of a pair.

[0019]

The elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction used for it since it is the above structures has a large  $I_c R_n$  value (amount which is the product of the critical current value  $I_c$  and the shunt resistance  $R_n$ , and shows the signal-processing capacity of the Josephson tunnel junction) compared with a superconduction proximity effect component, and since a SQUID output increases in proportion to  $I_c R_n$ , the SQUID magnetic sensor of invention of this application can expect increase of output/input ratio, i.e., the improvement in sensibility, and can use it as a SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity.

[0020]

moreover Directivity can be given to an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by using any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker, and the single crystal processed thinly, as a single crystal of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced. Because make especially the single crystal of the high temperature superconductor of a pair into a bismuth system and the superconduction phase considers as any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases, or two sorts or more of these phases of combination Since it has an anisotropy with an expensive bismuth system superconductor, it is expectable to give directive high sensibility in the direction of a crystal interface.

[0021]

Moreover, the production approach of the SQUID magnetic sensor invention this application It is the production approach of the SQUID magnetic sensor using the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel

junction which the single crystal of the high temperature superconductor of a pair was made to cross on a substrate by heat treatment in the crossover include-angle range of  $-90^\circ$  of  $0^\circ$ , and was combined. It is characterized [ big ] by forming the through tube which penetrates the single crystal of a pair including the joint interface, dividing an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction into two, and constituting joint loop-formation-like structure from a side face of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction with the single crystal of a pair. By the production approach of the SQUID magnetic sensor invention this application, the SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity of the configuration where two Josephson tunnel junctions were connected in the shape of a loop formation is producible easily and good using a single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction.

[0022]

And a through tube can be formed in an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction more easily and good by forming a through tube in an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction especially using convergence ion beam machining equipment.

[0023]

Micro processing of forming a through tube in the side face of the single crystal which the pair furthermore combined is narrowing the width of face of the part which puts slitting into the side face of the single crystal of the high temperature superconductor of the united pair, and forms a through tube from a very difficult thing, and it becomes possible for what is necessary to be just coming to form a through tube to the side face of the Josephson tunnel junction of width of face narrower than the width of face of the original single crystal, and to form a through tube more easily.

[0024]

Thus, since a SQUID output increases in proportion to  $I_c R_n$ , the produced SQUID magnetic sensor can expect increase of output/input ratio, i.e., the improvement in sensibility, and can use it as a SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity.

[0025]

moreover Directivity can be given to an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction by using any one sort or two sorts of combination, the shape of a whisker, and the single crystal processed thinly, as a single crystal of the high temperature superconductor of a pair used in case an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction is produced. Because make especially the single crystal of the high temperature superconductor of a pair into a bismuth system and the superconduction phase considers as any one sort of 2212 phases, 2201 phases, or 2223 phases, or two sorts or more of these phases of combination Since it has an anisotropy with an expensive bismuth system superconductor, it is expectable to give directive high sensibility in the direction of a crystal interface.

[0026]

Moreover, in the elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction used for invention of this application, as the application for patent 2002-275873 was explained in full detail, the thin insulator layer is sandwiched between superconductors and this insulator layer is formed in the interface of two crystals. Therefore, using the single crystal of a pair in the elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction used for the SQUID magnetic sensor of invention of this application can make the single Josephson tunnel junction form just because the insulator layer which is for making the suitable insulator layer for an interface form in one, and was formed in the interface of the single crystal of a pair is used. Moreover, since crystal orientation has turned [ single crystal ] to the one direction unlike polycrystal, it can change critical current density with the crossover include angle of the single crystal of a pair, and it can control the plasma frequency  $f_p$  of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction etc.

[0027]

By therefore, the thing to carry out to the  $0^\circ$ -degree range of  $-90^\circ$ , the include angle of the smaller one among the include angles of two kinds of magnitude which the crossover include angle of the single crystal of the high temperature superconductor of the pair combined on a substrate in an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction, i.e., the crossing single crystal of the bismuth system high temperature superconductor of a pair, makes It can originate in critical current density  $J_c$  changing depending on a crossover include angle, and the plasma frequency  $f_p$  of the elevated-temperature superconduction Josephson junction crossed and combined at the crossover include angle within the limits of this can be changed.

[0028]

That is, the plasma frequency  $f_p$  of the elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction used for invention of this application can control suitably the property of elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junctions, such as a plasma frequency, by changing according to a crossover include angle and changing the crossover include angle of the single crystal of the high temperature superconductor of a pair, and can produce the SQUID magnetic sensor which has a required property suitably.

[0029]

Along with the attached drawing, an example is shown hereafter, and the gestalt of implementation of invention of this application is explained in more detail. Of course, this invention is not limited to the following examples and it cannot be overemphasized that various modes are possible about details.

[0030]

[Example]

## &lt;Example 1&gt;

The SQUID magnetic sensor was produced using the production approach of the SQUID magnetic sensor invention this application, and that property was evaluated.

[0031]

An example of the process of the production approach of drawing 1 and the SQUID magnetic sensor of invention of this application to drawing 2 is shown.

[0032]

As first shown in drawing 1 (a) and the electron microscope image of drawing 2 (a), using the elevated-temperature superconduction whisker (1) which is the single crystal of a high temperature superconductor, and the pair of (2), (2) was made to intersect these elevated-temperatures superconduction whisker (1), and it has arranged on a substrate (3), and as shown in drawing 1 (b), it pasted up by heat treatment and the single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction (4) was produced.

[0033]

On that occasion, the elevated-temperature superconduction whisker (1) of a pair and the crossover include angle of (2) were made into near the crossover include angle of 45 degrees where critical current density  $J_c$  serves as min in this example, although it was possible to have produced an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction (4) as an include angle of arbitration in the range between 0-degree-90 °.

[0034]

And next, as shown in drawing 1 (c), drawing 2 (b), and drawing 3, micro processing which forms the elevated-temperature superconduction whisker (1) of a pair and the through tube (5) which penetrates (2) including the joint interface, and separates an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction (4) into two from the side face of the obtained single elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction (4) was performed. In addition, FIB (convergence ion beam machining equipment) was used for micro-processing equipment.

[0035]

From a difficult thing performing processing from direct width in that case, since the elevated-temperature superconduction whisker (1) of these pairs and the width of face of (2) are wide as shown in the electron microscope image of drawing 2 (a) In order to narrow the elevated-temperature superconduction whisker (1) of these pairs, and the width of face of (2) beforehand, Put in slitting as shown in the side face of both the elevated-temperature superconduction whisker (1) of these pairs, and (2) combined first by FIB at drawing 3, and an elevated-temperature superconduction whisker (1) and the width of face of (2) are narrowed. It was able to be processed by the ability having opened the through tube (5) from the side of an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction (4) after that, and the component (6) as shown in drawing 4 which is the electron microscope image of drawing 2 (b), drawing 3, and the important section enlarged drawing of drawing 2 was able to be obtained. This component (6) has the structure same when it sees from width as the conventional general SQUID (41) which detects a magnetic field using interference between the current which flows the Josephson junction (40) as shown in drawing 5, and the annular supercurrent produced by the magnetic field which adds to a ring, and a current flows in the direction of an arrow head as actually shown in drawing 6 R> 6.

[0036]

It was parallel to the crystal plane of composition, and when a magnetic field was impressed at right angles to a through tube (5), as it was shown at drawing 7, the phenomenon in which critical current vibrated according to the reinforcement of a magnetic field could be observed, and the magnetic field dependency of a critical current value was looked at by the obtained component (6). Signs that the critical current value is vibrating the about 50 oersted period to an impression magnetic field are shown by drawing 7. The 50 oersted magnetic field strength of this round term supports the magnetic field where one fluxoid quantum is inserted in a through tube, and this component (6) can be operated as a SQUID magnetic sensor by observing this vibration.

[0037]

## [Effect of the Invention]

The production approach of the SQUID magnetic sensor which can produce the SQUID magnetic sensor using an elevated-temperature superconduction Josephson tunnel junction and SQUID magnetic sensor of super-high sensitivity easily and good is offered by invention of this application as explained in detail above.

## [Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is the side elevation having shown an example of the process of the production approach of the SQUID magnetic sensor of this invention.

[Drawing 2] It is the electron microscope image in which an example of the process of the production approach of the SQUID magnetic sensor of this invention was shown.

[Drawing 3] It is the perspective view showing an example of the component obtained by the production approach of the SQUID magnetic sensor this invention.

[Drawing 4] It is the important section enlarged drawing of the electron microscope image of drawing 2.

[Drawing 5] It is the mimetic diagram of the conventional general SQUID.

[Drawing 6] It is the mimetic diagram showing the direction where the current of the SQUID magnetic sensor of invention of this application flows.

[Drawing 7] It is the graph which shows the magnetic field dependency of the critical current value in the component obtained by the production approach of the SQUID magnetic sensor invention this application.

[Description of Notations]

- 1 Two Elevated-temperature superconduction whisker
  - 3 Substrate
  - 4 Elevated-Temperature Superconduction Josephson Tunnel Junction
  - 5 Through Tube
  - 6 Component
- 

[Translation done.]

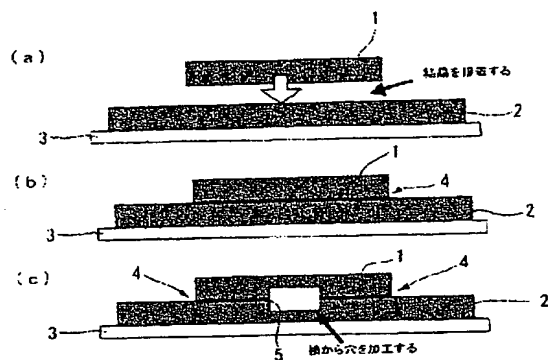
## \* NOTICES \*

JPO and NCIPJ are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

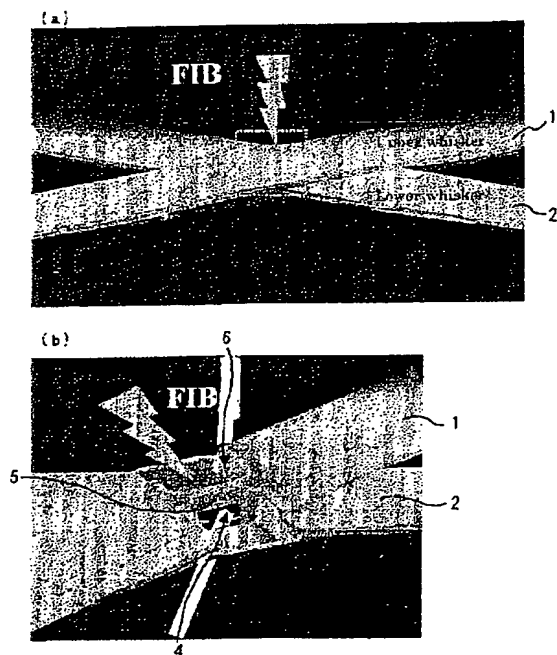
- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

## DRAWINGS

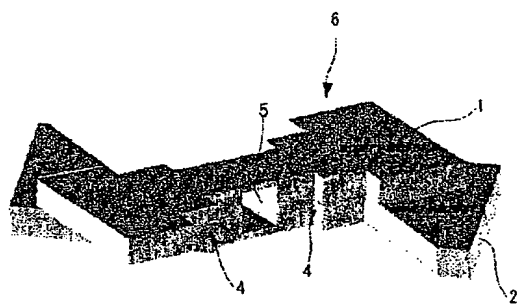
[Drawing 1]



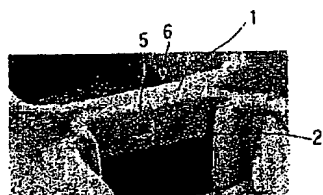
[Drawing 2]



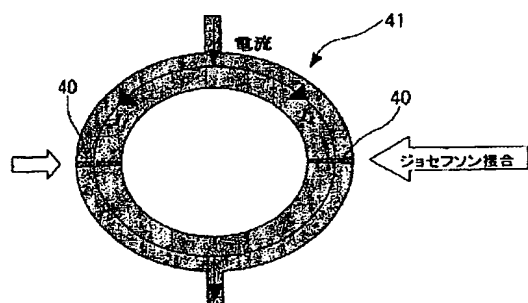
[Drawing 3]



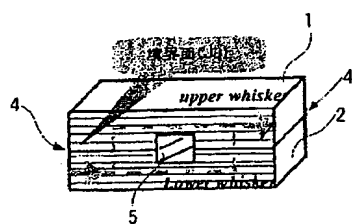
[Drawing 4]



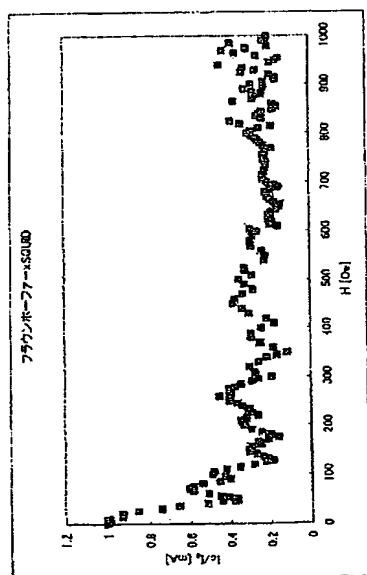
[Drawing 5]



[Drawing 6]



[Drawing 7]



---

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-296677

(P2004-296677A)

(43) 公開日 平成16年10月21日(2004. 10. 21)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>

HO 1 L 39/22  
GO 1 R 33/035  
HO 1 L 39/24

F I

HO 1 L 39/22 Z A A D  
GO 1 R 33/035  
HO 1 L 39/24 J

テーマコード (参考)

2 G O 1 7  
4 M 1 1 3

審査請求 有 請求項の数 9 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2003-85719 (P2003-85719)  
(22) 出願日 平成15年3月26日 (2003. 3. 26)

(71) 出願人 301023238  
独立行政法人物質・材料研究機構  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号  
(72) 発明者 高野 義彦  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号

独立行政法人物質・材料研究機構内  
(72) 発明者 羽多野 毅  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号

独立行政法人物質・材料研究機構内  
(72) 発明者 河上 真一  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号

独立行政法人物質・材料研究機構内  
最終頁に続く

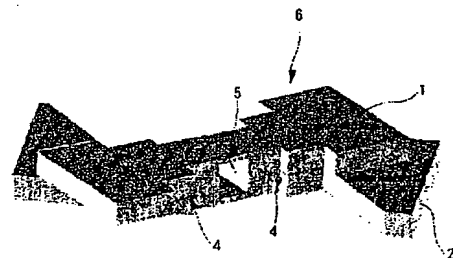
(54) 【発明の名称】 S Q U I D磁気センサーおよびS Q U I D磁気センサーの作製方法

(57) 【要約】

【課題】 超高感度のS Q U I D磁気センサーとそのS Q U I D磁気センサーの作製方法を提供する。

【解決手段】 一対の高温超伝導体の単結晶(1)と(2)を基板上に熱処理により交差角度0°-90°の範囲で交差させて結合し形成した単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)を用い、高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の単結晶をその結合界面を含めて貫通する貫通孔(5)を形成して高温超伝導ジョセフソントンネル接合を2つに分離し、一対の単結晶でループ状の結合構造を構成するS Q U I D磁気センサーとする。

【選択図】 図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

一対の高温超伝導体の単結晶が基板上に交差角度  $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  の範囲で交差されて結合されている単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いた S Q U I D 磁気センサーであって、  
高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の前記単結晶をその結合界面を含めて貫通させた貫通孔によって高温超伝導ジョセフソントンネル接合が 2 つに分離され、一対の単結晶でループ状の結合構造が構成されていることを特徴とする S Q U I D 磁気センサー。

**【請求項 2】**

高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一対の高温超伝導体の単結晶がウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか 1 種または 2 種の組み合わせであることを特徴とする請求項 1 記載の S Q U I D 磁気センサー。

**【請求項 3】**

一対の高温超伝導体の単結晶がビスマス系であり、その超伝導相が  $2212$  相、 $2201$  相もしくは  $2223$  相のいずれか 1 種またはこれらの相の 2 種以上の組み合わせであることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の S Q U I D 磁気センサー

**【請求項 4】**

一対の高温超伝導体の単結晶を熱処理により基板上に交差角度  $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  の範囲で交差させて結合した単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いた S Q U I D 磁気センサーの作製方法であって、  
高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の単結晶をその結合界面を含めて貫通する貫通孔を形成して高温超伝導ジョセフソントンネル接合を 2 つに分離し、一対の単結晶でループ状の結合構造を構成することを特徴とする S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【請求項 5】**

収束イオンビーム加工装置を用いて高温超伝導ジョセフソントンネル接合に貫通孔を形成することを特徴とする請求項 4 記載の S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【請求項 6】**

結合した一対の高温超伝導体の単結晶の側面に切り込みを入れて幅を狭くし、その後幅を狭くした部分に高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より貫通孔を形成することを特徴とする請求項 4 または 5 記載の S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【請求項 7】**

高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一対の高温超伝導体の単結晶がウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか 1 種または 2 種の組み合わせであることを特徴とする請求項 4 ないし 6 いずれかに記載の S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【請求項 8】**

一対の高温超伝導体の単結晶がビスマス系であり、その超伝導相が  $2212$  相、 $2201$  相もしくは  $2223$  相のいずれか 1 種またはこれらの相の 2 種以上の組み合わせであることを特徴とする請求項 4 ないし 7 いずれかに記載の S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【請求項 9】**

一対の高温超伝導体の単結晶の交差角度を変化させることで高温超伝導ジョセフソントンネル接合の特性を制御することを特徴とする請求項 4 ないし 8 いずれかに記載の S Q U I D 磁気センサーの作製方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】****【発明の属する技術分野】**

この出願の発明は、S Q U I D 磁気センサーおよび S Q U I D 磁気センサーの作製方法に関するものである。さらに詳しくはこの出願の発明は、高温超伝導ジョセフソントンネル

10

20

30

40

50

接合を用いた超高感度のSQUID磁気センサーとそのSQUID磁気センサーを容易かつ良好に作製することのできるSQUID磁気センサーの作製方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術とその課題】

超伝導体を用いたジョセフソントンネル接合素子(SIS-JJ素子)は超伝導素子の基本素子であって、高周波素子やSFQ素子(SFQ: Single Flux Quantum (単一磁束量子))、SQUID磁気センサー素子などとして応用が進められてきた。

【0003】

高温超伝導体を用いたジョセフソントンネル接合が作製されればさらに性能の向上が期待されることからこれまで多くの研究がなされてきたが、再現性の良い、高温超伝導体によるジョセフソントンネル接合はこれまで実現されていなかった。 10

【0004】

上記のような状況の中、この出願の発明者等は、一对の高温超伝導ウィスカー結晶を基板上で交差させた状態で熱処理を行うことで結合し、その一对の高温超伝導ウィスカー結晶の結合部分に単一のジョセフソントンネル接合を作製することを提案した(特許文献1および特願2002-275873)。

【0005】

しかしながら、上記のようなジョセフソントンネル接合は現段階ではその作製方法や特性が見出されたばかりでありそれを用いた応用はこれまでなされていなかった。 20

【0006】

【特許文献1】

特開2002-141566

【0007】

そこで、この出願の発明は、以上のとおりの事情に鑑みてなされたものであり、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いた超高感度のSQUID磁気センサーとそのSQUID磁気センサーを容易かつ良好に作製することのできるSQUID磁気センサーの作製方法を提供することを課題としている。

【0008】

【課題を解決するための手段】

この出願の発明は、上記の課題を解決するものとして、まず第1には、一对の高温超伝導体の単結晶が基板上に交差角度 $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ の範囲で交差されて結合されている単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いたSQUID磁気センサーであって、高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一对の前記単結晶をその結合界面を含めて貫通させた貫通孔によって高温超伝導ジョセフソントンネル接合が2つに分離され、一对の単結晶でループ状の結合構造が構成されていることを特徴とするSQUID磁気センサーを提供する。 30

【0009】

第2には、第1の発明において、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一对の高温超伝導体の単結晶がウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか1種または2種の組み合わせであることを特徴とするSQUID磁気センサーを提供する。 40

【0010】

第3には、第1または2の発明において、一对の高温超伝導体の単結晶がビスマス系であり、その超伝導相が2212相、2201相もしくは2223相のいずれか1種またはこれらの相の2種以上の組み合わせであることを特徴とするSQUID磁気センサーを提供する。

【0011】

第4には、一对の高温超伝導体の単結晶を熱処理により基板上に交差角度 $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ の範囲で交差させて結合した単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いたSQUID 50

D磁気センサーの作製方法であって、高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の単結晶をその結合界面を含めて貫通する貫通孔を形成して高温超伝導ジョセフソントンネル接合を2つに分離し、一対の単結晶でループ状の結合構造を構成することを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。

【0012】

第5には、第4の発明において、収束イオンビーム加工装置を用いて高温超伝導ジョセフソントンネル接合に貫通孔を形成することを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。

【0013】

第6には、第4または5の発明において、結合した一対の高温超伝導体の単結晶の側面に切り込みを入れて幅を狭くし、その後幅を狭くした部分に高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より貫通孔を形成することを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。 10

【0014】

第7には、第4ないし6いずれかの発明において、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一対の高温超伝導体の単結晶がウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか1種または2種の組み合わせであることを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。

【0015】

第8には、第4ないし7いずれかの発明において、一対の高温超伝導体の単結晶がビスマス系であり、その超伝導相が2212相、2201相もしくは2223相のいずれか1種またはこれらの相の2種以上の組み合わせであることを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。 20

【0016】

第9には、第4ないし8いずれかの発明において、一対の高温超伝導体の単結晶の交差角度を変化させることで高温超伝導ジョセフソントンネル接合の特性を制御することを特徴とするSQUID磁気センサーの作製方法を提供する。

【0017】

【発明の実施の形態】

この出願の発明は上記のとおりの特徴をもつものであるが、以下にその実施の形態について説明する。 30

【0018】

この出願の発明のSQUID磁気センサーは、一対の高温超伝導体の単結晶が基板上に交差角度 $0^\circ - 90^\circ$ の範囲で交差されて結合されている単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いたSQUID磁気センサーであって、高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の前記単結晶をその結合界面を含めて貫通させた貫通孔によって高温超伝導ジョセフソントンネル接合が2つに分離され、一対の単結晶でループ状の結合構造が構成されていることを大きな特徴としている。

【0019】

この出願の発明のSQUID磁気センサーは上記のような構造であることから、それに用いられる高温超伝導ジョセフソントンネル接合が超伝導近接効果素子に比べて $I_c R_n$ 値（臨界電流値 $I_c$ とシャント抵抗値 $R_n$ の積であり、ジョセフソントンネル接合の信号処理能力を示す量）が大きく、SQUID出力が $I_c R_n$ に比例して増加することから、出力／入力比の増大すなわち感度の向上が期待でき、超高感度のSQUID磁気センサーとして利用することができる。 40

【0020】

また、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一対の高温超伝導体の単結晶としてウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか1種または2種の組み合わせを用いることで高温超伝導ジョセフソントンネル接合に指向性を持たせることができ、とくに一対の高温超伝導体の単結晶をビスマス系とし、その超伝導相が2212相 50

、2201相もしくは2223相のいずれか1種またはこれらの相の2種以上の組み合わせとすることで、ビスマス系超伝導体が高い異方性を有することから、結晶界面方向に指向性の高い感度を持たせることが期待できる。

#### 【0021】

また、この出願の発明のSQUID磁気センサーの作製方法は、一対の高温超伝導体の単結晶を熱処理により基板上に交差角度 $0^{\circ} - 90^{\circ}$ の範囲で交差させて結合した単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いたSQUID磁気センサーの作製方法であって、高温超伝導ジョセフソントンネル接合の側面より一対の単結晶をその結合界面を含めて貫通する貫通孔を形成して高温超伝導ジョセフソントンネル接合を2つに分離し、一対の単結晶でループ状の結合構造を構成することを大きな特徴としている。この出願の発明のSQUID磁気センサーの作製方法により、単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いて、2つのジョセフソントンネル接合がループ状につながった形状の超高感度のSQUID磁気センサーを、容易かつ良好に作製することができる。

#### 【0022】

そして、とくに収束イオンビーム加工装置を用いて高温超伝導ジョセフソントンネル接合に貫通孔を形成することで、より容易かつ良好に高温超伝導ジョセフソントンネル接合に貫通孔を形成することができる。

#### 【0023】

さらに一対の結合した単結晶の側面に貫通孔を形成するといった微細加工は極めて難しいことから、結合した一対の高温超伝導体の単結晶の側面に切り込みを入れて貫通孔を形成する部分の幅を狭めることで、元の単結晶の幅よりも狭い幅のジョセフソントンネル接合の側面に対して貫通孔を形成すれば良くなり、より容易に貫通孔を形成することが可能となる。

#### 【0024】

このようにして作製されたSQUID磁気センサーは、SQUID出力が $I_c R_n$ に比例して増加することから、出力／入力比の増大すなわち感度の向上が期待でき、超高感度のSQUID磁気センサーとして利用することができるのである。

#### 【0025】

また、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を作製する際に用いられる一対の高温超伝導体の単結晶としてウィスカー状または細く加工した単結晶のいずれか1種または2種の組み合わせを用いることで高温超伝導ジョセフソントンネル接合に指向性を持たせることができ、とくに一対の高温超伝導体の単結晶をビスマス系とし、その超伝導相が2212相、2201相もしくは2223相のいずれか1種またはこれらの相の2種以上の組み合わせとすることで、ビスマス系超伝導体が高い異方性を有することから、結晶界面方向に指向性の高い感度を持たせることが期待できる。

#### 【0026】

また、この出願の発明に用いられる高温超伝導ジョセフソントンネル接合では、特願2002-275873においても詳述したように、超伝導体の間に薄い絶縁体層がサンドイッチされており、この絶縁体層は2つの結晶の界面に形成されている。したがってこの出願の発明のSQUID磁気センサーに用いられる高温超伝導ジョセフソントンネル接合において一対の単結晶を用いるのは1つに界面に適切な絶縁体層を形成させるためであり、一対の単結晶の界面に形成された絶縁体層を用いるからこそ単一のジョセフソントンネル接合を形成させることができる。また単結晶は多結晶と異なり結晶方位が一方向に向いていることから一対の単結晶の交差角度により臨界電流密度を変化させることができ、高温超伝導ジョセフソントンネル接合のプラズマ周波数 $f_p$ などを制御することができるのである。

#### 【0027】

したがって高温超伝導ジョセフソントンネル接合において基板上で結合する一対の高温超伝導体の単結晶の交差角度すなわち交差する一対のビスマス系高温超伝導体の単結晶がなす2種類の大きさの角度のうち小さい方の角度を $0^{\circ} - 90^{\circ}$ の範囲にすることで、この

範囲内の交差角度で交差して結合する高温超伝導ジョセフソン接合のプラズマ周波数 $f_p$ 、を、臨界電流密度 $J_c$ が交差角度に依存して変化することに起因して変化させることができる。

【0028】

すなわちこの出願の発明に用いられる高温超伝導ジョセフソントンネル接合のプラズマ周波数 $f_p$ は交差角度に応じて変化するものであり、一対の高温超伝導体の単結晶の交差角度を変化させることで、プラズマ周波数などの高温超伝導ジョセフソントンネル接合の特性を好適に制御することができ、適宜必要な特性を有するSQUID磁気センサーを作製することができるのである。

【0029】

以下、添付した図面に沿って実施例を示し、この出願の発明の実施の形態についてさらに詳しく説明する。もちろん、この発明は以下の例に限定されるものではなく、細部については様々な態様が可能であることは言うまでもない。

【0030】

【実施例】

<実施例1>

この出願の発明のSQUID磁気センサーの作製方法を用いてSQUID磁気センサーを作製しその特性の評価を行った。

【0031】

図1および図2にこの出願の発明のSQUID磁気センサーの作製方法の工程の一例を示す。

【0032】

まず図1(a)および図2(a)の電子顕微鏡像に示すように高温超伝導体の単結晶である高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の一対を用い、それら高温超伝導ウィスカー(1)と(2)を交差させて基板(3)上に配置し、図1(b)に示すように熱処理により接着して単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)を作製した。

【0033】

その際に、一対の高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の交差角度を $0^\circ - 90^\circ$ の間の範囲で任意の角度として高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)を作製することが可能であるが、この例においては、臨界電流密度 $J_c$ が最小となる交差角度 $45^\circ$ 付近とした。

【0034】

そして次に、図1(c)、図2(b)および図3に示すように、得られた単一の高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)の側面より一対の高温超伝導ウィスカー(1)と(2)を、その結合界面を含めて貫通する貫通孔(5)を形成して高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)を2つに分離する微細加工を行った。なお微細加工装置にはFIB(収束イオンビーム加工装置)を用いた。

【0035】

その際に、図2(a)の電子顕微鏡像に示すようにそれら一対の高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の幅が広いため直接横から加工を行うのは難しいことから、前もってそれら一対の高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の幅を狭めるため、まず結合したそれら一対の高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の両方の側面にFIBにより図3に示すような切り込みを入れて高温超伝導ウィスカー(1)と(2)の幅を狭め、その後高温超伝導ジョセフソントンネル接合(4)の横から貫通孔(5)を開けて加工を行い、図2(b)の電子顕微鏡像、図3および図2の要部拡大図である図4に示すような素子(6)を得ることができた。この素子(6)は、横から見た場合、図5に示すようなジョセフソン接合(40)を流れる電流とリングに加える磁場によって生じる環状の超伝導電流間の干渉を用いて磁場を検出する従来の一般的なSQUID(41)と同様の構造を有しており、実際図6に示すような矢印の方向に電流が流れるのである。

【0036】

10

20

30

40

50

得られた素子(6)に、結晶接合面に平行で貫通孔(5)に垂直に磁場を印加したところ、図7に示すように、磁場の強度に応じて臨界電流が振動する現象を観測でき、臨界電流値の磁場依存性が見られた。図7では臨界電流値が印加磁場に対し、約50エルステッド周期で振動している様子が示されている。この一周期の磁場強度50エルステッドは磁束量子一本が貫通孔へ挿入される磁場に対応しており、この振動を観測することでこの素子(6)をSQUID磁気センサーとして機能させることができるのである。

【0037】

【発明の効果】

以上詳しく説明したとおり、この出願の発明によって、高温超伝導ジョセフソントンネル接合を用いた超高感度のSQUID磁気センサーとそのSQUID磁気センサーを容易かつ良好に作製することのできるSQUID磁気センサーの作製方法が提供される。 10

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明のSQUID磁気センサーの作製方法の工程の一例を示した側面図である。

【図2】この発明のSQUID磁気センサーの作製方法の工程の一例を示した電子顕微鏡像である。

【図3】この発明のSQUID磁気センサーの作製方法により得られた素子の一例を示す斜視図である。

【図4】図2の電子顕微鏡像の要部拡大図である。

【図5】従来の一般的なSQUIDの模式図である。 20

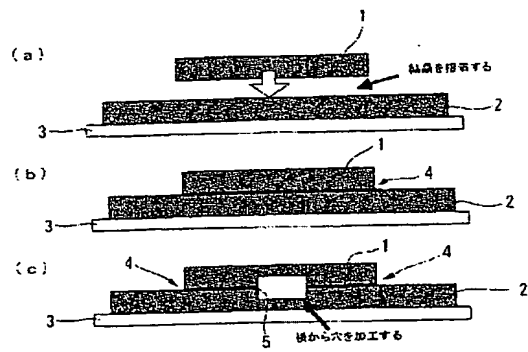
【図6】この出願の発明のSQUID磁気センサーの電流の流れる方向を示す模式図である。

【図7】この出願の発明のSQUID磁気センサーの作製方法により得られた素子における臨界電流値の磁場依存性を示すグラフである。

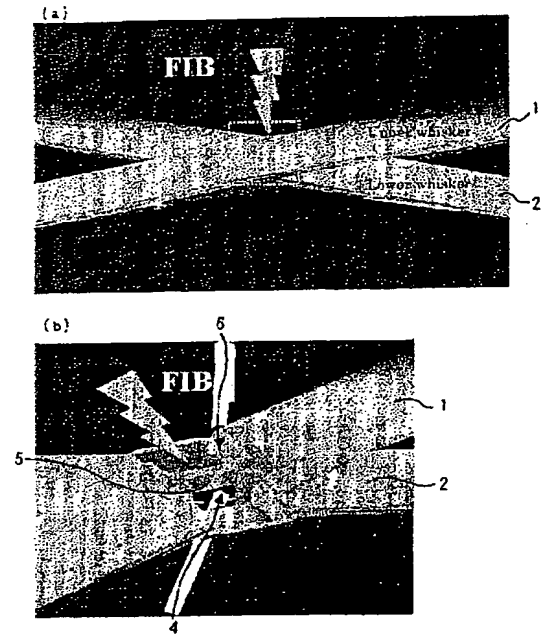
【符号の説明】

- 1, 2 高温超伝導ウィスカー
- 3 基板
- 4 高温超伝導ジョセフソントンネル接合
- 5 貫通孔
- 6 素子 30

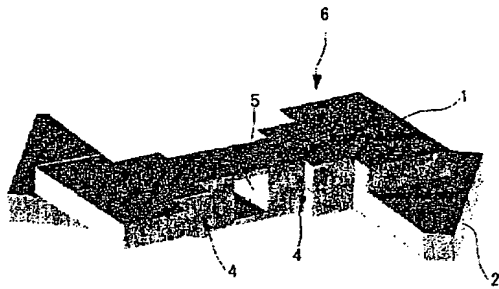
【図 1】



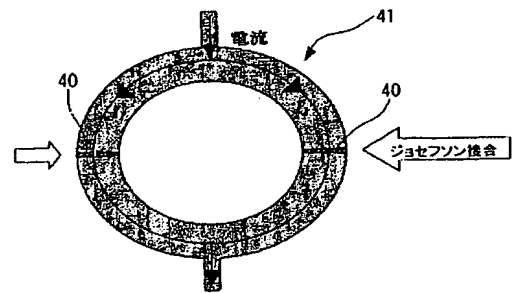
【図 2】



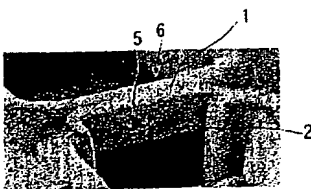
【図 3】



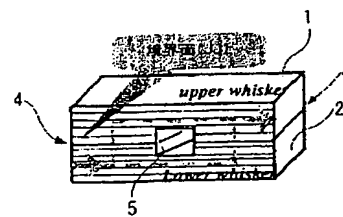
【図 5】



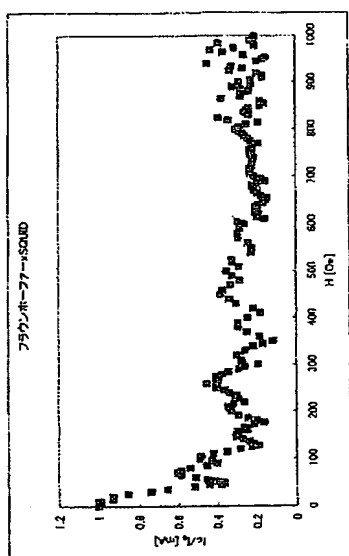
【図 4】



【図 6】



【図 7】



## フロントページの続き

- (72)発明者 石井 明  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号  
法人物質・材料研究機構内  
独立行政
- (72)発明者 有澤 俊一  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号  
法人物質・材料研究機構内  
独立行政
- (72)発明者 立木 昌  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号  
法人物質・材料研究機構内  
独立行政
- (72)発明者 山下 努  
茨城県つくば市千現一丁目2番1号  
法人物質・材料研究機構内  
独立行政

Fターム(参考) 2G017 AA13 AD39

4M113 AA06 AA16 AA23 AC08 BB01 BB07 CA35

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**